

視覚・力覚を用いた能動的センシング技術の研究

右川 友彦*

1. はじめに

ロボット作業においては、様々なセンシング情報を作業意図に沿って能動的に活用したり、それら情報を効果的に統融合して作業意図に沿った情報に変換する能動的センシング技術の確立が重要な課題の一つになっている。例えば、ロボットによる組立作業では視覚・力覚・触覚などの単独情報のみで把持物体と作業対象物・作業環境との相互関係を常に的確に把握することは難しい。物体の接触状態を視覚で見るときにも、他の物体により遮られて見えなくなるケースが頻繁に生じる。また力覚では接触して初めて情報が得られるので、力覚のみで全ての情報を得ようとするとは効率が悪い場合がある。従って、これら異なるセンサ情報を作業状況に応じて能動的に活用し、必要に応じて統融合する技術が求められている。

今回は、視覚から得られた複数の接触面情報とロボットハンドの手首に装着した6 軸力センサ情報とを必要に応じて選択・融合することにより、把持物体と他物体の接触位置を推定する方法を提案し、これに基づく実験を行った。

2. 接触位置の推定原理

視覚センサにより得られた情報から接触面の推定ができる場合には、力覚センサから得られる接触点を通る外力ベクトルの情報とを融合することにより、接触位置を推定することが可能となる。これは以下の原理に基づき、これらの関係を図1 に示す。視覚情報により得られた接触面 P_i の拘束条件は複数個の平面方程式により表すことができる。

$$a_i \cdot X + b_i \cdot y + c_i \cdot Z = d_i \quad \dots (1)$$

ここで多面体表現により考えると、点接触の場合には $i \geq 4$ 、線接触では $i=1,2,3$ 、面接触においては $i=1,2$ 、と表すことができる。

一方、力覚センシングにおける基本式は以下のように表すことができる。

$$\Delta A \cdot r_e = M \quad \dots (2)$$

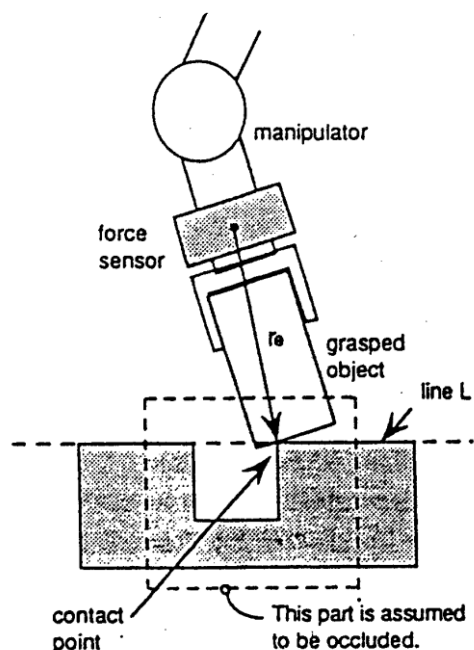


図1 Determination of contact position using fusion of vision and force sensor information

ただし, $r_e = (X_e, Y_e, Z_e)_t$ は図1 に示すように, 力覚センサ中止からみた接触点の位置ベクトル, M はモーメント, ΔA はカベクトルによる 3×3 の行列である。

ここで, $r_e = (X_e, Y_e, Z_e)_t$ をワールド座標に直した接触位置ベクトル r_w は(1)式を満足しているので, 結局, (1)と(2)を結合した線形連立方程式

$$C_{vf} \cdot r_w = D \cdot \dots \dots \dots (3)$$

により接触点の位置を推定することができる。

(3)式において C_{vf} は係数行列であり, 視覚センサ情報に基づく拘束条件と力覚センサ情報に基づく拘束条件とを融合するセンサ融合マトリクスである。

3. 接触位置の推定実験

前節で述べた原理に基づき, 把持物体と他物体との接触点の3次元位置を推定することができる。そのシステムの第一段階として, 視覚系の処理を簡略化し接触点の2次元位置の推定を行った。これは, 図2 のようにカメラにより把持物体が接触する物体側の接触面 P の断面形状を観察でき, かつ接触点の位置は視覚で直接観察することのできないような組立作業の最終局面を想定したものである。

(例えば, 別の物体で接触点が遮蔽されているような場合がこれに相当している。) また, カメラはキャリブレーションにより幾何パラメータが得られており, 画像面で求める一つの直線 L から接触平面 P の(1)式が推定できるものとする。視覚情報からは一つの拘束しか得られないため, 力覚情報より面 F に投影した各力成分を求め, これと視覚情報により得られた接触面の方程式から(3)式により把持物体の接触点の面 F に投影した2次元位置を推定する。

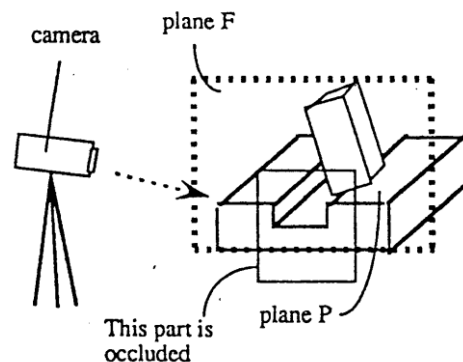


図2 Experiments of estimating contact position in two dimensional case

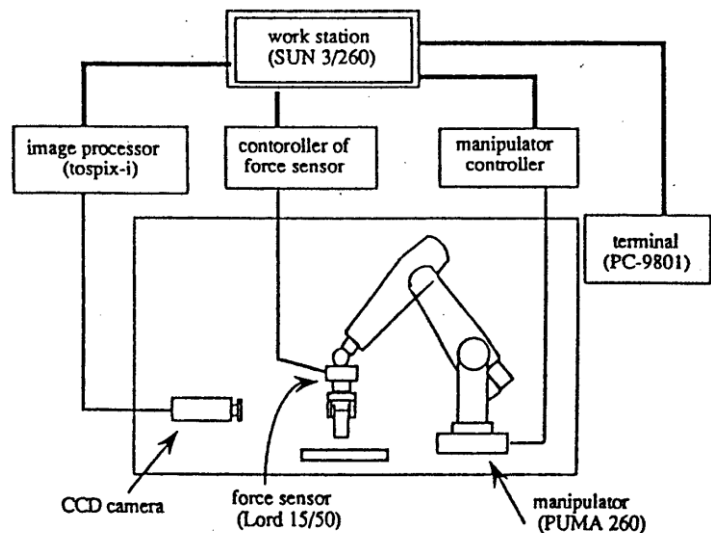


図3 Blockdiagram of the experimental system

3.1 実験システムの構成

前記の実験として, 直方体(48x48x70mm)をマニピュレータで把持し, 溝を持つ台に接触させてその接触位置を推定する実験を試みた。全体のシステム構成を図3 に示す。

視覚情報と力覚情報を融合する処理プログラムは、ワークステーション(sun3/260)上でオブジェクト指向言語EusLisp により記述している。断面形状抽出の画像処理に画像処理装置(tospix-i)を用い、断面領域の輪郭線を折れ線近似して接触面に対応する直線を決定する。マニピュレータ(PUMA260)とエンドエフェクタの間に装着された6 軸のカセンサ(Lord 社15/50)からの情報は、専用コントローラを介してワークステーションに取り込まれる。非接触時および接触時における力とモーメントを観察し、その差分から力覚センサ中L、から見た外力ベクトルを含む直線の情報を得ている。

3.2 実験結果

図1 の場合においても、(a)溝のコーナーが直方体の底面に接触する場合と (b)直方体のコーナーが溝の上面に接触する場合などがある。これらの接触状態を図4 に示す。今回は各々の場合について実験を行いセンシング情報を能動的に活用することにより接触位置を推定した。

(a) 溝のコーナーが直方体の底面に接触する場合

視覚系において、作業空間における1 画素あたりの 3 次元的誤差をシミュレーションした結果、図2における面F 近辺では最大0.7mm の誤差を含む。これは、CCD カメラ自身の分解能と作業空間との距離により大きく影響を受ける。視覚的な誤差を小さく抑えるためには、視覚センサと作業対象物との距離を小さくすることやステレオビジョン方式とすることによって解決することができる。また、視覚と対象物の相対位置関係も誤差に大きく影響を与える要因であり、どのような位置から視覚情報を得るかというのも大きなポイントである。

今回は、周辺歪みの影響を受け難い視野一杯に作業範囲をとり、かつ作業対象物が視野中心近辺に位置するように設定を行った。

一方、力覚系では接触点の推定精度は平面情報を既知として実験を行った結果、把持物体底面において最大 $\pm 1\text{mm}$ の誤差であった。この誤差は、接触点に加える力の大きさ、力覚センサ中心、からの外力ベクトルを含む直線までの距離、接触面に対する直線の傾きにより影響を受ける。また、力覚情報に対する座標変換を行う段階で、マニピュレータの位置座標を用いているためにマニピュレータ自身の誤差の影響も受ける。不実験に使用したマニピュレータの繰り返し精度は $\pm 0.05\text{mm}$ である。力覚センシングによる誤差を小さく抑えるためには、加える力についてはより大きくすることがカベクトルを大きくできるため有効であり、力覚センサ中心からみた外力ベクトルを含む直線ま

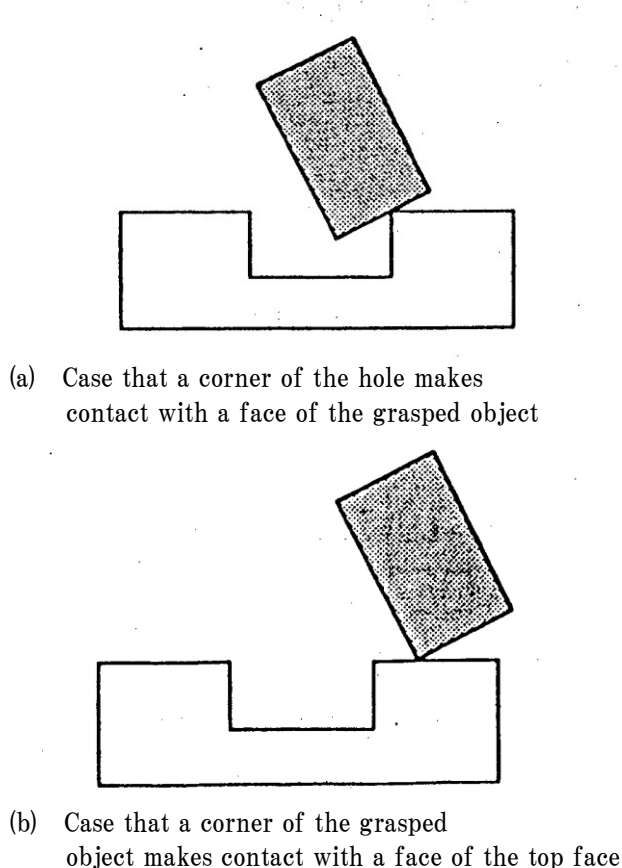


図4 Two cases of contact between the

での距離は、接触位置の推定において力覚情報の誤差がこの距離に比例して大きくなることから小さくとる方がよいことがわかる。

差の影響も受ける。不実験に使用したマニピュレータの繰り返し精度は $\pm 0.05\text{mm}$ である。力覚センシングによる誤差を小さく抑えるためには、加える力についてはより大きくすることがカベクトルを大きくできるため有効であり、力覚センサ中しからみた外力ベクトルを含む直線までの距離は、接触位置の推定において力覚情報の誤差がこの距離に比例して大きくなることから小さくとる方がよいことがわかる。

また、接触面とカベクトルを含む直線とを可能な限り直交するようにとることで、視覚と力覚の双方の誤差の影響を小さく抑えることができ、それらの交点としての接触位置の推定精度を向上させることが可能になることがわかった。

(b) 直方体のコーナーが溝の上面に接触する場合

この場合は、接触状態の判別問題に帰着する。マニピュレータにより物体を把持する場合、視覚情報を用いて相対関係を認識しているが、このとき得られた把持物体の側面情報と接触点が同一直線上に存在する場合は(b)の状態である。この状態において挿入作業を行う場合、把持物体の側面と推定接触点がある距離を持つ状態に導くのが一つの方法である。つまり、推定接触点が把持物体の接触している側の側面から一定距離以上になるまで接触点の推定動作を繰り返し行い、(a)の状態の問題に帰着解決することができる。また、把持物体における特徴点(可視部分の頂点等)の位置を視覚により計測し推定接触点の位置と比較することにより、把持物体がどの状態にあるか、の判別を行うことができる。ここで(b)の状態であることが認識できれば、同じアプローチにより解決することができる。これらの方法を用いることにより(a) (b)の状態によらず本方式により挿入作業を行うことができる。

総合的な精度を調べるために、接触点の情報に基づいて幅48mm の把持物体を50mm の溝に挿入させる実験を(a) (b)の状態について行い、本方式の有効性を確認した。

4. むすび

今回は、マニピュレータに把持した物体と他物体との接触位置を視覚情報と力覚情報の融合により推定する方法と実験を行った。この方法を用いることにより能動的にセンシング情報を活用することができ環境や接触状態に関わらず作業を行うことができた。今後の課題としては、3次元への拡張、接触状態の識別、視覚と力覚のセンシング計画の自動化などがある。

本研究を進めるにあたり、数々のご指導ご助言をいただいた電子技術総合研究所坂根茂幸室長をはじめとするETL ロボットグループの皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 特集:センサ情報の統融合, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.6, (1990)
- 2) 北垣, 小笠原: 肯動的力覚センシングによる接触点位置推定, 日本機械学会第68 期全国大会, (1990)
- 3) T. Matsui and M. Inaba: